

農業地域LCAの手法：評価の前提と枠組み

著者	大村 道明
雑誌名	農業経済研究報告
巻	34
ページ	35-50
発行年	2002-10-31
URL	http://hdl.handle.net/10097/33430

農業地域LCAの手法 —評価の前提と枠組み—

大 村 道 明*

目 次

- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1. はじめに | 6. 環境問題のカテゴリーと物質収支 |
| 2. LCAとは | 7. PLCA ソフトによる農業地域の |
| 3. プロブレム・シフティングとは | 評価方法 |
| 4. 農業に期待される環境関連の機能 | 8. 残された課題 |
| 5. 農業LCAの役割 | |

1. はじめに

環境に対する意識の高まりとともに、循環型社会構築に向けた様々な取り組みが始まっている。循環型社会の最終目標は、持続可能な社会の実現であると考えられる。持続可能な社会とは、石油などの枯渇性（ストック）資源に頼らず、太陽光やバイオマス等を、再生可能な範囲内で（フロー）エネルギー・資源として利用する社会である（註1）。

しかし、現在想定されている循環型社会では、物質の見かけ上の循環は可能であっても、それが環境への悪影響を低減し得る循環であるのか否かについて客観的かつ包括的な評価を行っていない場合が多い。また、ある環境問題への対処が別の環境問題を誘発する現象である「プロブレム・シフティング」を回避する措置が取られていない場合が多い。枯渇性資源の多くは、今後数十年の期間内に採取不可能になる可能性もあり、持続可能な社会への移行に際しては、客観的かつ包括的な評価に基づく「最短距離」を求める必要がある。

環境負荷の定量評価手法であるライフサイクルアセスメント（以下LCAと表記）は、これまで工業製品の環境影響評価手法として発展してきた。近年、農業分野でも注目が高まり、様々な事例研究が取り組まれている（註2）。

本稿では、LCAを循環型社会構築のためのサポート・ツールとして活用するための方法について、その評価の前提と枠組み（フレームワーク）を、LCAの方法論と、農業に期待される機能の観点から考察する。以下2.ではLCAについて概説し、3.ではLCAによって把握することが可能な現象であるプロブレム・シフティングについて述べる。4.では循環型社会の中で農業に期待される機能について考察し、5.では、農業地域に関するLCAが循環型社会構築に向けて果たし得る役割について検討する。これらを踏まえて、6.では農業地域の評価と環境問題のカテゴリー、および把握すべき物質収支の関係について述べ、7.ではPLCA（製品LCA）用ソフトウェアTEAM3.0を利用した農業地域LCAの具体的な手法について述べる。最後に、8.では残された課題を整理する。

* 東北大学大学院農学研究科地域計画学分野助手

註1) 現在の定義では、循環型社会とは、できる限り廃棄物量を減らし、できる限り環境負荷を低く抑える、という定義である。しかし、本源的にはロベール [1] の定義する、フローエネルギーの利用を基調とする社会であるべきであり、ここでいう持続可能な社会とは、ロベールの定義による社会を指す。

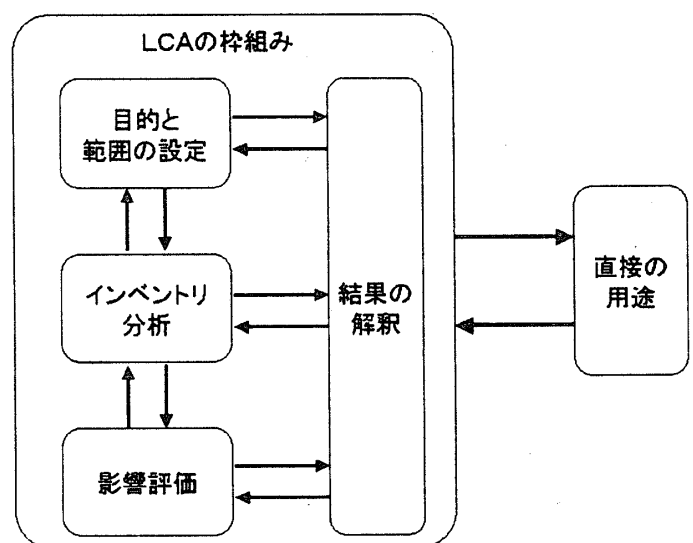
註2) 農業分野のLCAの事例研究は、文献 [6] を参照。

2. LCAとは

LCA (Life Cycle Assessment: ライフサイクル分析・生涯サイクル分析) は、ひとつの製品またはサービスが、その原材料取得段階から、使用過程を経て最終的に廃棄処理され、使命を終えるまでの全生涯 (from the cradle to the grave: ゆりかごから墓場まで) にわたる社会への影響、特に環境影響を全て算出し、総合的な見地から環境負荷の少ない製品・サービス開発を進めるための評価手法として提唱されたものである [4]。

このようなLCAは、1969年に、コカ・コーラ社がMRI (Midwest Research Institute: アメリカ、ミッドウエスト研究所、現フランクリン研究所) に委託した、飲料容器の使い捨て・リターナブルの優劣比較に関する環境影響評価に始まり、世界初のデポジット制導入の根拠となったと言われている [9]。日本では、1980年代に包装容器の散乱や、処理方法が問題となったプラスチック産業界を中心に導入され、現在に至るまで、主に工業製品の環境影響評価手法として発展した。1997年にはISO14040 (Life cycle Assessment - Principles and Framework-) によって、環境マネジメント支援技法として規格化された [4]。この規格は、工業製品の規格のように詳細かつ厳密な規格ではなく、その名のとおり基本原則と枠組み、最低限必要な要件を示している。これは、LCAが開発途上の手法であるとの認識に基づく。つまり、規格の中で「全ての状況に対して最適な手法ではない。(特に製品の経済性と社会面の評価において)」としながらも、様々な応用可能性と、事例研究の蓄積を考慮したものである。

具体的には、LCAは、①目的と範囲の設定②インベントリ分析③影響評価④結果の解釈、の4つのステップからなる [3]。第1図にLCAのフレームと、それぞれのステップとの関連を示す。図のように、LCAの各ステップは順番的なものではなく、LCAを進める中で得られたデータや結果によって目的や範囲を修正しつつ繰り返しの行われるものである。ここで直接の用途とは、評価対象となる製品・サービスの比較・改善、環境政策や環境戦略の立案、



第1図 LCAのフレーム 出典 [3]

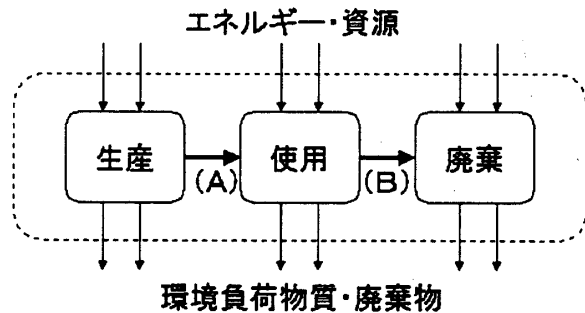
マーケティング等をいう。

それぞれの実施方法と手順は以下のようなものである。

①目的と範囲の設定

目的と範囲の設定は、製品・サービスの「機能単位」と調査目的に応じた調査対象と、把握すべき環境問題の影響範囲を明確化するステップである。機能単位とは、LCA評価の対象となる製品・サービスが提供する本質的な機能の単位である。例えば、動物性たんぱく質（肉）を1kg供給する、という機能を、牛、豚、家禽への穀物給餌で達成する場合、それぞれ穀物の量では約11kg, 7kg, 4kgがその必要量であり、家禽が最も効率が良い（註3）。この例では、牛、豚、家禽の肉はそれぞれ食味や熱量（カロリー）の点で異なるが、肉1kgという機能において同一ととらえることにより、穀物という物質の消費量で比較可能なのである。

LCAでは、製品・サービスの生涯を第2図のようにモデル化する場合が多い。製品のライフサイクル（生涯）は、生産・使用・廃棄の各ライフステージを統合することによって表現される。機能単位は、第2図の中で（A）或いは（B）のフロー量で表現される。範囲（システム・バウンダリー）は、第2図中における点線で表され、評価対象とする製品・サービスの影響する範囲や調査目的に応じて決定する（註4）。



第2図 LCAにおける評価対象モデルの例

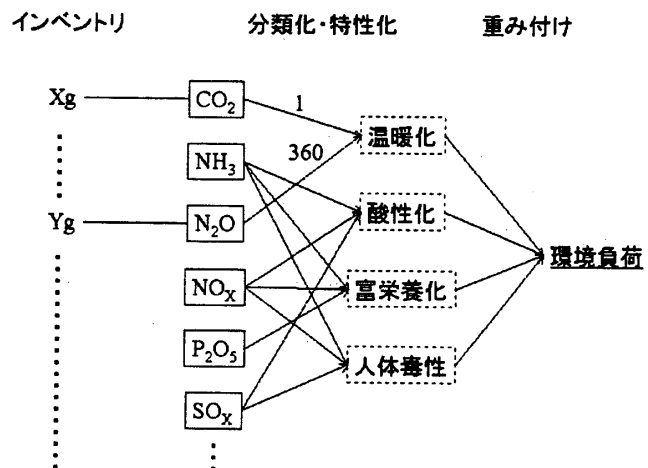
②インベントリ分析

インベントリ（Inventory：辞書では「明細目録」だが、LCA用語としてインベントリと訳される。）分析とは、LCAの評価対象とする、製品・サービスのシステム（モデル）に対する、ライフサイクル全体を通じての資源・エネルギー等の物質の入力、及び排気・廃棄物等の物質の出力を定量化する分析である。これは、第2図で、点線の範囲（システム・バウンダリー）を越えて出入りする矢印で表される物質の流れであり、それぞれのライフステージについて、その量を把握する必要がある。

③影響評価

影響評価では、分類化、特性化、重み付けを行う。

分類化・特性化とは、インベントリによって把握された各物質を、環境問題のカテゴリーごとに特性化する作業である。第3図に環境負荷を導出するまでの概念



第3図 環境負荷を導出するまでの概念

について示す。例えば、温暖化は、 CO_2 と N_2O の排出量に関連があり、 CO_2 、 N_2O はそれぞれ1, 360の特性化係数を持つ。従って、第3図のインベントリから導出される温暖化負荷は $X \times 1 + Y \times 360$ となる。重み付けとは、トータルの環境負荷を導出する際に、算出された特性化項目の環境負荷数値に重み付けするもので、恣意的な行程といえる。例えば、石油エネルギーを大量に消費する製品のLCAの場合、最も重いウエイトは温暖化に置かれることになる。LCAソフトウェアでは、分類化・特性化はソフトウェアが演算処理し、特性化係数は、ある程度一般化された指標を用いる。

④結果の解釈

結果の解釈では、感度分析と不確実性分析を行い、LCA評価結果に対する前提条件の影響度を把握する。感度分析とは、インベントリで仮定した各物質量の数値を変動させ（例えば-25%～+25%）、最終結果の変動に対する感度を算出する。不確実性分析は、評価対象となるLCAモデルで想定される、前提条件のブレを、確率分布や乱数で表現し、その最終結果への影響を算出する。

註3) 数値は文献[12]による。簡単な例を以下に示す。紙コップと陶器製のカップの環境影響をLCAで比較する際には、機能単位を「一般家庭の1年間の飲料消費」とすれば、紙コップには使用ステージでは洗浄しない（水を汚さない）、という利点があるが、寿命が短く、製造ステージと廃棄ステージで環境負荷が発生する。陶器製カップには、使用ステージでは環境負荷は大きい、寿命が長いという利点がある。この例では、紙コップ一個と陶器製カップ一個を比較すれば、明らかに陶器製カップが環境影響の面で不利である。しかし、1年間の飲料消費の際に使用する容器すべてを機能単位とすれば、陶器製カップは一個で済むが、紙コップは365個必要かもしれない。このように、機能単位の取り方によって、環境負荷の解釈のしかたは異なり、LCAによる製品同士の環境負荷比較では、製品の機能に応じた機能単位の設定が求められる。

註4) 文献[13]によれば、システム・バウンダリーは、①環境と評価対象システムの境界、②他のシステムと評価対象システムの境界、③特に考慮すべき評価対象システムと、それ以外、の3つがベーシックである。

3. プロブレム・シフティングとは

プロブレム・シフティング（以下PSと表記）とは、ある環境問題への対応が、別の環境問題を誘発する現象を指し、ライフステージ間、問題特性間、地域間の3種類がある。LCAは、環境対策等によるPSの発生を回避する上で有用な手法であるが、LCAの持つこの特徴については、これまで注目されていなかった。以下では、PSについて解説し、PSを把握しうるLCAモデルのあり方について述べる。

①ライフステージ間PS

第2図で、生産・使用・廃棄のように表される各「ライフステージ」間のPSを指す。例えば、ある農産物のLCAで、ライフステージを「資材の生産」・「農業生産活動」・「農産物の消費」のよ

うにライフステージを設定する。仮に化学肥料と堆肥が肥料として同一の効果を発揮するための重量は、堆肥が化学肥料より大きく、化学肥料と堆肥の製造時のエミッション（環境負荷物質の排出）が、単位重量あたりでは同等であり、農地で使用した場合堆肥の方が、硝酸態窒素のエミッションが穏やか（少ない）と仮定した場合、「農業生産活動」ステージで堆肥の使用を推奨し、化学肥料への代替を実施すると、「資材の生産」ステージのエミッションは増加することになる。これは、使用ステージのエミッション低減策が、生産ステージのエミッションを増加させる例である。つまり、あるシステム中の一つのライフステージだけを評価して、環境負荷低減策を策定すると、このPSが発生する可能性がある。

②問題特性間PS

環境問題特性間のPSを指す。例えば、農産物への残留期間の短い農薬へのシフトは、人体毒性を低減するための措置であるとする。しかし、農薬散布の間隔が短くなることにより、石油エネルギーを使用する動力噴霧器等の使用頻度が増える場合、これは、人体毒性から地球温暖化へのPSを意味する。つまり、人間の健康への影響が減少されても、地球温暖化への影響は増加することになる。ある一つの問題特性だけでシステムを評価し、その結果だけを利用するシステムの改変は、このPSが発生する可能性がある。

③地域間PS

ある地域の環境問題対策が別の地域の環境問題へと移転するPSを言う。例としては、地域間の環境基準・規制格差に伴う廃棄物や有害物質の移動等が挙げられる。これは、環境基準の厳しい先進国で処理困難な有害廃棄物が、環境基準の無い途上国へと越境移動する状況がイメージされる。さらに拡大解釈すれば、ある地域で実施した環境影響対策により、地域外からの資材供給が増加した場合、その地域の環境影響は減少しても、地域外での資材生産による環境負荷が対策前と比較して増加すれば、地域間PSが発生しているともとらえられる。

LCA手法の特徴は、上述のPSを把握可能であること、とされていた[13]。その後、前述のようにISOで規格化されるが、規格ではPSの把握よりも、手法としての信頼性の確立に重点が置かれている（註5）。日本国内では、環境負荷を低減する社会システムの構築支援ツールとしてLCAの利用が注目され[2]、ある地域を対象にLCA評価する「地域LCA」の構想もある（註6）。これまでのLCAは、工業製品分野を対象とする製品LCA（PLCA）が主体であり、ある製品の環境影響については①ライフステージ間PSと②問題特性間PSに関する評価が主体であった。③地域間PSは看過されがちであったが、これは、地域という概念をLCA評価に導入した場合、機能単位が設定し難いこと、製品の製造ステージに比べ、使用・廃棄・リサイクルステージのマテリアル・フローがモデル化し難いことに理由があると思われる。例えば、工場で製造された製品は、多くの場合製造された地域と異なる地域の消費者のもとで使用される。現在では処分方法は消費者の意思に委ねられており、使用する地域や処分（廃棄またはリサイクル）のバリエーションも多岐にわたる。従って、LCA評価のモデルは複雑化する。しかし、循環型社会あるいは環境に配慮した地域づくり、といった場面では、③地域間PSまでも考慮した、地域LCAが要求されることが考えられる。つまり、①・②を把握するLCAはエコラベルやグリーン購入への消費者意思決定の支援は可能であるが（註7）、

③を把握するLCAでなければ、地域計画に資する有効なツールとなり得ない。以下では、農業地域計画へのLCA適用について、農業の持つ環境関連の機能について整理しながら考察する。

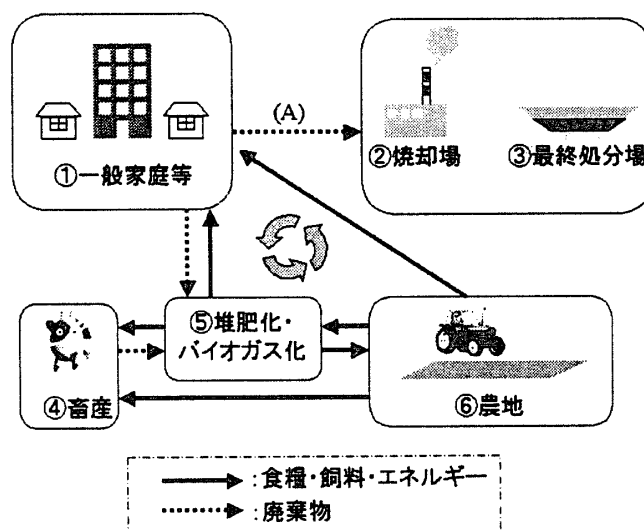
註5) 現在、産業総合研究所で研究が進められている被害算定型LCAも、手法的な透明性・信頼性の確立を重視していると思われる[1]。

註6) 経済産業省は、県レベルでの地域LCAモデル事業を平成15年度実施する予定。研究主体は(独)産業技術総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター及び社団法人産業環境管理協会。

註7) いわゆるタイプⅢラベルは、JEMAI(社団法人産業環境管理協会)が発行を始めた。このラベルは、JEMAIが定めたルールに基づくLCAで定量評価を行った製品に付されるラベルで、消費者は製品の環境情報をインターネットで検索して得ることができる。よって、ラベルの有無が環境負荷の高低をただちに表すものではない[10]。

4. 農業に期待される環境関連の機能

農業と環境のかかわりを表すキーワードに、「多面的機能」がある。内容は、①国土の保全、②水源の涵養、③自然環境の保全機能、④良好な景観の形成、⑤文化の伝承が挙げられている。また、最近では農業の自然循環機能の維持増進という目標も掲げられた[14]。第4図に、農業と環境の関連について示す。LCAによる環境影響評価が可能なものは、上述のキーワードのうち、③自然環境の保全機能および自然循環機能の維持増進である。これを、第4図に則して解釈する。これまで①



第4図 農業と環境の関連

一般家庭(および食品関連産業)から排出される有機性廃棄物は、②焼却場・③最終処分場で処理されていた。農業では、④畜産における適正な糞尿処理の必要性から、⑤堆肥化・バイオガス化によるその処理が有望視されている。⑤で処理された後の有機性残渣は⑥農地で利用する。ここで、⑤を介して一般家庭の有機性廃棄物を農業に取り込むことにより循環系が形成される。この循環系の形成により、(A)で示す廃棄物フローが減少するとともに、②・③からのエミッションが減少し、環境負荷が減少することが期待される。つまり、農業には、食料生産・廃棄物処理・エネルギー生産の機能が期待されている。農業における廃棄物処理とは、農業および他産業に由来する有機性廃棄物の堆肥化とその利用である。また、エネルギー生産とは、有機性廃棄物の嫌気発酵によるバイオガス発生と、バイオガス燃焼による発電・熱回収等、また、木質バイオマスやエネルギー作物の

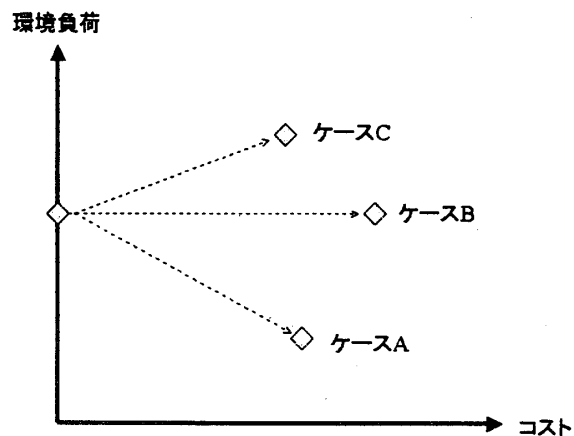
栽培と、その燃焼による発電・熱回収等である（註8）。

宮城県廃棄物処理計画（素案）でも、農業は廃棄物の再生利用率が高く、最終処分量が少ない産業とされている。また、気候変動枠組条約締結国会議（COP）の京都議定書が批准された場合、日本は1990年を基準として2008年～2012年までに6%の温室効果ガスを削減する必要がある。このうち、3.7%が土地利用の変化・森林活動による温室効果ガスの「吸収」（シンク）に割り当てられていることから[2]、農業の持つ環境負荷低減効果として、特に廃棄物処理、エネルギー生産機能への期待の大きさがうかがえる。

註8）北欧（スウェーデン）では、下水汚泥を処理（堆肥化）し、それをエネルギー作物（Salix）栽培に利用し、地域熱供給（District heating）を行っている地域が既にある[11]。北欧のこのシステムは、農家にはオルタナティブな収入源の確保、環境保全の面では化石燃料消費量の削減に寄与している。ヨーロッパの食料事情と日本の相違は大きい。農地を利用するエネルギー生産では、食料生産との競合が発生する。しかし、農業（農家）の維持という観点からは、農業におけるエネルギー生産は新しい可能性を示すものととらえられる。つまり、食料生産だけで農業・農家の維持が不可能な状況下では、エネルギー生産や廃棄物処理による農業の活性化と、それに伴う食料生産維持・増進の可能性が考えられる。

5. 農業LCAの役割

農業LCAの役割は現状把握、環境負荷低減策の効果の把握、意思決定支援の3点が挙げられる。第一に農業に期待される環境負荷低減効果について定量的に把握し、その結果を開示することである。これにより、農業が環境負荷低減効果を有し、循環型社会に資することが可能であるならば、それを証明することができる。LCAは相対評価手法であり、絶対評価の手法ではない。言い換えれば、同じ機能を持つ二つ以上のシステムを比較することにより、それらの環境影響を定量的に比較する手法である。



第5図 環境負荷と費用の関係

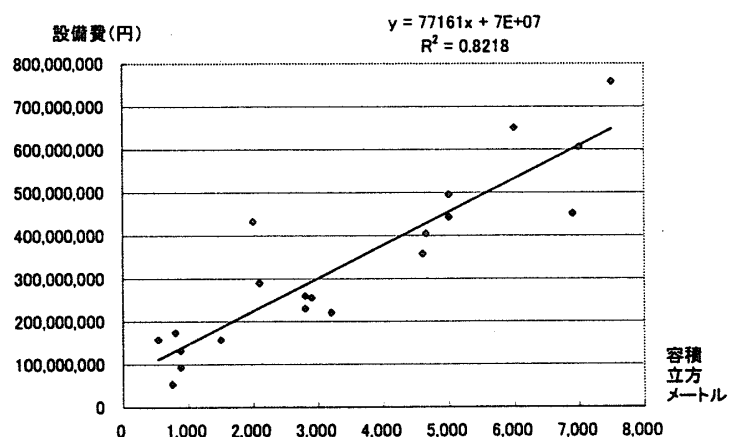
よって、農業の環境影響評価においては、まず、第一の役割として現状分析が必要で、その後、第4図のような循環系を形成した場合等を、PSを配慮しつつ、現状分析の結果と比較することにより、どの程度環境影響が変化するかを評価することが可能となる。つまり、ある環境負荷低減策が有効であるか否かを判断することが第二の役割である。

農業に求められる環境負荷低減効果を得るために検討されている施策では、第4図の⑤のような設備が新たに必要とされる場合が多い。例えば、堆肥化施設、バイオガスプラント、木質バイオマ

ス発電施設である。これらの施設の設置には、多額の費用が必要である。よって、これらの施設導入後、つまり経費投入後は、現状と比較して環境負荷は低下することが望ましい。これは、第5図のケース A に相当する。また、農業は、現状でも環境負荷低減効果を有すると仮定し、農業以外の産業の環境負荷を低減するために農業に何らかの変化が必要な場合でも、図中ケース B のように、投入コストに対して環境負荷は現状維持でなければ、(ケース C のような状況では) PS を回避することができない。

しかし、ある環境負荷低減策の結果が、ケース A、ケース B のような状況であっても、その施策の主体にとって、コストが負担不能であれば、その施策は実現不可能である。バイオガスプラントや堆肥化施設建設には、JA や行政が出資するケースが多い。JA や行政による農業地域計画の場面を想定すると、地域の農業を対象とする LCA で現状を把握し、複数の環境負荷低減策について、現状からの環境負荷の変化とコストの関係を示す事により、地域計画を行う主体は最も費用対効果の大きい施策を選択する事ができる (註 9)。このように、農業地域の LCA 結果とコストの関係を明確化し、意思決定支援を行うこと

が、第三の役割である。第 6 図に、バイオガスプラントの発酵槽容積と設備費 (建設費) の関係を示す。図のように、設備と建設費用の関係は、その設備の規模にほぼ比例する。従って、設備の規模を示す指標を適切に設定すれば、施設の建設費用についてある程度推測することができる。このような経費 (コスト) 予測と、LCA を組み合わせれば、第 3 の役割を担うことができる。



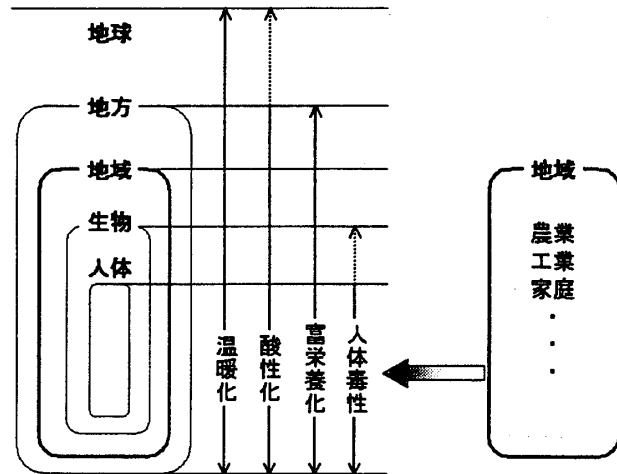
第 6 図 バイオガスプラントの発酵槽容積と設備費
N=20. 文献 [7] より作成.

註 9) JA や行政の統括範囲に、LCA の評価対象地域を重ねることで、LCA 評価結果を利用して、その地域の環境負荷を低減させるための課税あるいは補助金政策を策定することも考えられる。

6. 環境問題のカテゴリーと物質収支

LCA で環境影響評価を行う際には、評価対象と環境問題との関係を考慮して環境問題のカテゴリーを選択する必要がある。これまでの農業 LCA では、多くの場合エネルギー消費量の把握による地球温暖化カテゴリーの評価、窒素の動態解析による富栄養化カテゴリーの評価が、それぞれ単独で取り組まれてきた。単独のカテゴリー評価では、問題特性間 PS を把握することはできない。よって、農業地域の LCA の特色を考慮した複数の問題特性カテゴリーで評価を行う必要がある。第 7

図に、ある「地域」に起因する環境影響と、その範囲の概念図を示す。温暖化は、ある地域の農業等によって大気中に排出されたCO₂等の温暖化物質に起因し、問題の影響範囲は地球全体に及ぶと考えられる。酸性化も同様に、大気中に排出された酸性化物質による問題で、主に陸圏の問題である。富栄養化は、土壌中や水中に排出された富栄養化物質による問題で、地下水や表流水の流域の問題であり、地域偏重の度合いは温暖化や酸性化に比べて大きいと考えられる。人体毒性は、大気や水、食物を通じて健康に害を及ぼす物質の排出に起因する問題であり、人間の生活領域から生物の生息圏に対する問題と考える事ができる（註10）。



第7図 「地域」に起因する環境影響とその範囲

農業生産活動と、これらの特性化カテゴリーとの関係は、次のように考えられる。温暖化と酸性化は、農業にも影響が及ぶ。富栄養化と人体毒性は、主に農業以外への影響が考えられる。従って、農業地域LCAの際に、この4つの特性化カテゴリーについて評価することにより、地域内の農業生産活動が地域の内外、農業・農業以外に与える影響を把握することができ、同時に問題特性間PSを把握することができる。

註10) 特性化カテゴリーは、この他にもEcobilan TEAM3.0には、水生環境毒性 (Aquatic Eco-toxicity)、臭気 (Odor)、陸圏環境毒性 (Terrestrial Eco-toxicity)、非再生資源の枯渇 (Depletion of non renewable resources)、オゾン層破壊 (Depletion of ozone layer)、光化学オキシダント生成 (Photochemical oxidant formation) 等がある。

7. PLCAソフトによる農業地域の評価方法

本研究で使用するソフト、TEAM3.0は、PwCEcobilan社製のLCA用ソフトウェアである。このソフトウェアは、工業製品のLCA (PLCA)用で、農業地域のLCAを実施する機能はない。しかし、インベントリやインパクトアセスメントの計算は、以下の方法により可能となる。

TEAM3.0による農業地域LCAモデル構築の前提条件は、3種類すべてのPSを把握可能なこととする。農業は、①食料生産、②廃棄物処理、③エネルギー生産の各機能を同時に発揮するもの、とする。第8図に、農業地域を対象とするLCAモデルと、その評価範囲について示す。実線で囲んだ範囲がLCA評価の対象地域であり、ライフステージを地域農業・一般家庭・廃棄物処理とする。地域農業は、エネルギーとその他資材を用いて農業生産活動を行い、一般家庭に供給する。一般家庭は、エネルギーを消費して廃棄物を排出し、廃棄物は処理場で焼却処理される。この際、地域農業は、農業生産活動を通じてエネルギー生産と廃棄物処理を行う。第8図において、一点鎖線で囲

んだ範囲がLCAの評価境界（システム・バウンダリー）である。対象地域内のライフステージに関わるエネルギー・資源について、その生産に関わる環境負荷についても、対象地域の諸活動に起因するとみなす。

以下では、第8図の各ライフステージについて、それぞれの内部構成、マテリアル・フローのプロファイル作成方法（TEAM3.0への入力項目の決定方法）と、農業が①食料生産、②廃棄物処理、③エネルギー生産の各機能を発揮する際に生じるライフステージ間のマテリアル・フローの増減について、その基本的な考え方を述べる。

(1) 農業

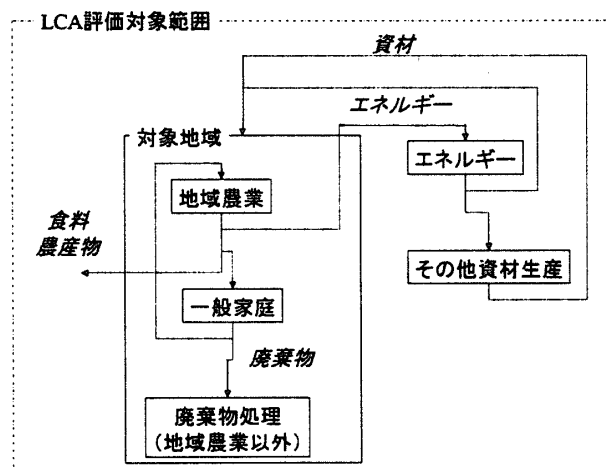
第9図に、第8図のライフステージ「地域農業」に内包（ネスト）される、細分化されたライフステージについて示す。

稲作・畑作・園芸作物等、土地利用型農業と、施設型農業を併せた農業生産活動は、季節ごと（図中では春夏秋冬の4区分）の作付面積で表現する。これらは、作目ごと、単位面積ごとに物質のインプット・アウトプット表（プロフィール表）を作成する。プロフィール表の作成に必要なデータは、各地域で利用されている基準・指標（主に農家経営指標）および現地におけるヒアリングより作成する。

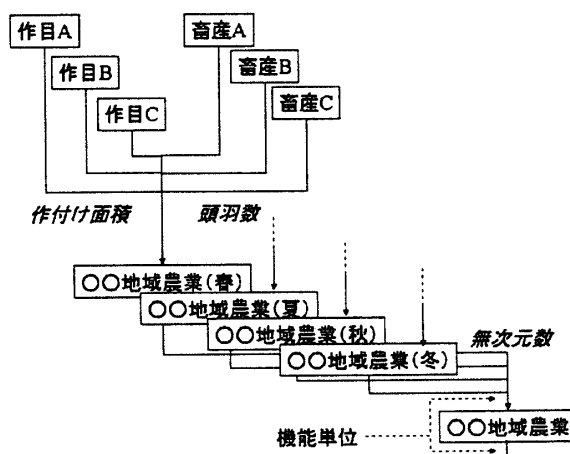
畜産の場合は、地域内で飼養される頭羽数で地域農業を表現する。ほとんどの場合、春夏秋冬通じて飼養頭数は一定と考えられる。また、畜産の場合、飼養する動物の種類ごとにプロファイル表を作成する。

インプットはエネルギー、化学肥料、堆肥、液肥（バイオガス導入の場合）、ビニル類とし、アウトプットはエネルギー消費に伴うエミッション、肥料分の流出とする。データは、基準・指標・ヒアリングから推計する。第1表にさとうきび（夏植）のプロファイルについて例示する。

評価対象地域における作付け面積・飼養頭羽数を、各期でまとめて、ライフステージ「地域農業」とする。第9図において、季節ごとのライフステージとライフステージ「地域農業」を結ぶフロー及び、ライフステージ「地域農業」から出て行くフローは無次元数であり、量にも意味を持たないが、「評価対象地域の農業」を表すものとし、これを機能単位に設定する。



第8図 地域LCAモデル概要と評価範囲



第9図 農業のライフステージ設定

農業における①食料生産、②廃棄物処理、③エネルギー生産については、モデル内では以下のように表現する。①食料生産については、必要な資材やエミッションは、作目ごと、単位面積ごと、単位頭羽数ごとに物質のインプット・アウトプット表（プロファイル表）に表現される。生産された農産物の消費に関してはモデル内では明示的に扱う事が難しい。農産物の出荷量・輸送距離を作目ごとに把握し、プロファイル表の数値に導入する方法が考え得る（註11）。②廃棄物処理については、農業生産活動に必要な資材である化学肥料に、廃棄物に由来する堆肥や液肥が代替された場合を想定する。この場合、廃棄物処理場への持ち込み廃棄物量の減少と、化学肥料製造に関わるエネルギー等の消費量の減少による環境負荷の低減が考えられる。③エネルギー生産については、エネルギー作物の作付けと、バイオマス発電プラントによる発電、あるいは、家畜糞尿の集積と、バイオガスプラントにより発電する場合を想定し、これらによる電力は一般家庭等にも供給されるものと仮定する。この場合、従来一般家庭で利用されていた電力を、農業由来の再生可能エネルギーに転換することになり、従来の発電に伴う環境負荷が削減されるとする。

（２）一般家庭

一般家庭は、農家の生活を含む概念で、エネルギーを消費（インプット）して廃棄物を排出（アウトプット）するステージとする。使用するエネルギーは、電力のみに単純化する。これは、農業でエネルギー生産が可能な場合、一般家庭で利用可能なエネルギーは電力のみと想定したためである（註12）。対象地域のエネルギー消費量は、全国平均値として280kWh/月を世帯数に乗じて算出する。

また、廃棄物は、可燃物とする。農業で廃棄物処理が可能な場合、可燃物のうち、厨芥類などの有機性残渣が、堆肥やバイオガスの原料として利用可能であるとする。

（３）廃棄物処理

農業における廃棄物処理ではなく、従来の廃棄物処理を指すステージである。具体的には、焼却処分および埋め立て場での最終処分である（註13）。このステージでは、石油および電力を消費し、ごみ処理を行う。つまり、インプットはエネルギーとごみである。アウトプットは、焼却場のエミッションであり、焼却施設ごとに作成される計量証明から推計する。この計量証明には、ごみの種類・組成の他、焼却炉からの排気ガスの計量結果が記載されている（註14）。ごみのうち、厨芥類を有機性残渣ととらえ、堆肥やバイオガスの原料として利用可能であるとする。有機性残渣を利用した場合、ごみ処理量はその分減少するものとし、ごみ焼却・埋め立てに伴うエネルギー消費・エミッションも減少すると仮定する。

第1表 プロファイル表の例

		単位	さとうきび(夏植)
INPUT	軽油・ガソリン	l/10a	53.7
	電力	kWh/10a	0.0
	堆肥	kg/10a	774.2
	化学肥料	kg/10a	326.0
	その他	kg/10a	0.0
OUTPUT	CO2fossil	g/10a	133,670.4
	NOxasNO2	g/10a	1,342.1
	NH3	g/10a	174.2
	N2O	g/10a	1,000.0
	unspecified N	g/10a	26,019.0
	P2O5	g/10a	0.0

鹿児島県0改良普及所『作物別収益性標準及び農業生活の指標』より作成

(4) エネルギー及びその他資材生産

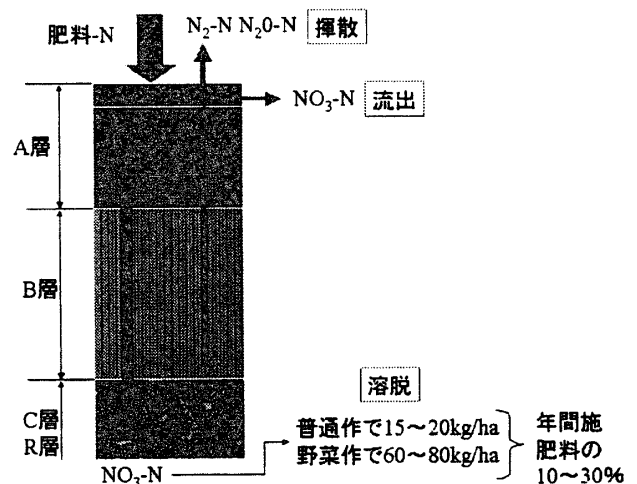
このステージでは、上記(1)～(3)の各ステージで発生するインプットのエネルギーや資材を生産(アウトプット)するステージとする。エネルギーや資材を生産する際に必要な資材については、TEAM3.0データベースに存在するデータの範囲内でモデルを構築する。

各ライフステージについて、それぞれの内部構成、マテリアル・フローのプロファイル作成方法はおおよそ以上のようなものである。ここで問題となるのが、地域農業ステージにおける富栄養化のエミッションの推計方法である。温暖

化・酸性化・人体毒性の各場合では、エミッションの発生源と、エミッション物質の拡散媒体が明確であるが、富栄養化の場合には、それを明確に定義することが難しい。温暖化等の場合には、エミッションは石油エネルギーを消費するステージから生じ、大気中へと拡散し、環境負荷となる。しかし、富栄養化の場合には、富栄養化物質(窒素分)のエミッションは第10図のように、空气中、土壤中(土壌水中)、表流水中へと拡散する。投入した窒素分と、エミッションの割合(窒素収支)は、畑の場合第2表のようになるが、これは、第11図のような窒素の可逆的な形態変化によるものである。

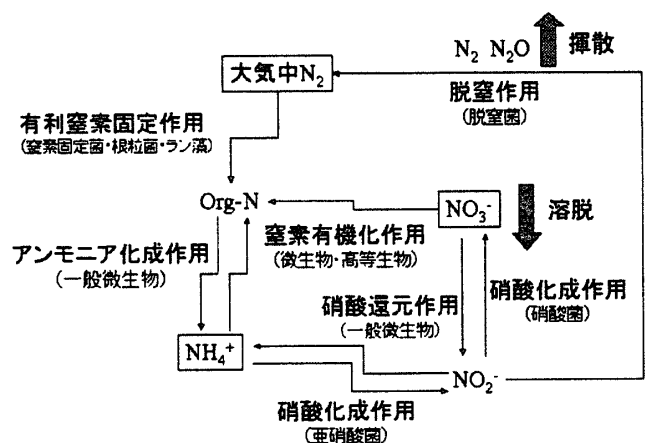
変化を促す要因としては、土壌の質、土壌の水分含有量、土壌への降雨量、土壌の有機物含有量、等多岐にわたる。従って、窒素収支は土壌の状況ごとに異なり、定式化することが難しい。また、環境負荷との因果関係を考える上では、大気中に揮散する場合と表流水系へ流出する場合には富栄養化環境負荷とエミッションの因果関係が明確であるが、地下へと溶脱する場合には、解釈が難しい。つまり、ある地域の土壌から溶脱した窒素分が、飲料水や灌漑用水として、地下水流域の

下流で使用されない場合には、環境負荷が発生しているとは考え難い場合も存在する。しかし、日本の場合、地形連鎖を利用した農業では、山間地域の畑から溶脱した窒素は平野の水田で湧出する



第10図 富栄養化物質のエミッション

文献 [15]－[16] より作成



第11図 窒素の形態変化

文献 [14] より作成

第2表 畑土壌における窒素収支の一例

		kg/ha	構成比(%)	肥料=100	
INPUT 408.7	肥料	342.5	83.8	100.0	堆肥・化学肥料
	雨	6.6	1.6	1.9	
	無機化	59.6	14.6	17.4	
	土壌残存	0	0.0	0.0	繰越無しと仮定
OUTPUT 408.7	脱窒	16.8	4.1	4.9	N ₂ , N ₂ Oと推定
	流出	76.3	18.7	22.3	NO ₃ +NH ₃ +Org-Nと推定
	作物吸収	254.6	62.3	74.3	
	土壌残存	61	14.9	17.8	NH ₃ +Org-Nと推定

文献 [14] より作成

地下水と共に水田に入り、脱窒作用を受けることがある（註15）。このため、本研究では土壌からの溶脱窒素であっても環境負荷を生じる可能性があるものとし、第10図のA層・B層の窒素収支を推計し、これらの層から排出される窒素分をエミッションとみなし、環境負荷を生じる原因物質とみなす。このような解釈により、第1表のようなプロファイル表を作目ごとに作成することが可能となり、PLCAソフトウェアを用いた農業地域のLCAが実施できる。

註11) 農産物には、人間へのエネルギー供給源である食料の他にも、家畜の餌や嗜好品といったものがあり、人間が摂取する際の熱量（カロリー）で単純化することは困難である。しかし、第4図のような物質循環を想定し、そこで発揮される機能として食料供給を想定する場合、評価対象地域に出入りする食料の輸送距離・量について把握すれば、地域内での食料消費の効果を図ることも可能と思われるが、この点は今後の課題である。

註12) 北欧における農業からのエネルギー供給では、電力以外にも熱供給が行われている。北欧の場合、再生可能エネルギーが注目される以前から、地域熱供給システム（District heating）のインフラ整備が進められていたという背景がある。日本では、一般家庭に熱を供給するインフラ設備は無く、農業由来の再生可能エネルギーのうち、一般家庭に供給可能なエネルギーは電力のみである。

註13) 管理型埋め立て処分場では、埋め立て場の底部に不透水性シートが敷設されており、降雨等による浸出水は、ろ過や吸着等の処理が必要であり、これにエネルギー消費を要する。また、埋め立てたごみからの硫化水素やメタンのエミッションもあるが、本評価ではこれを捨象する。

註14) 調査を行った福島県M町の焼却処理施設の平成12年1月の計量証明では、排ガスの計量は、ばいじん、硫酸化物、窒素酸化物、酸素、炭酸ガス、一酸化炭素、塩化水素について行われている。

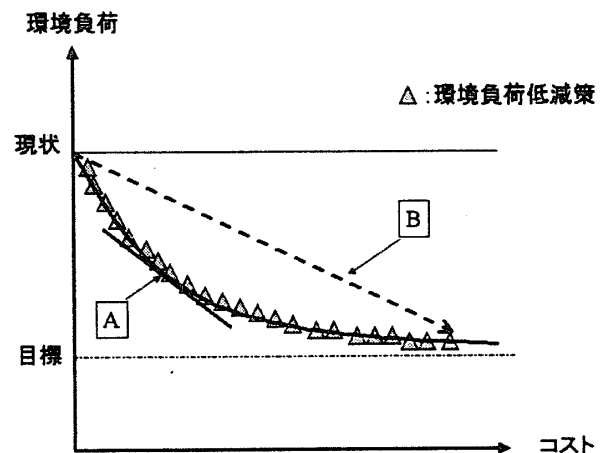
註15) 地形連鎖に関しては、文献 [8] を参照。この他にも、鹿児島県O島等の島嶼地域などでは、飲料水や灌漑用水を地下水に依存する事例もあることから、富栄養化物質のエミッションに関する解釈を本文のようにした。

8. 残された課題

農業地域LCAの手法における評価の前提と枠組みについては、本研究により、①PS（プロブレム・シフティング）が把握可能なモデル構築が必要であること、②農業の機能を、食料生産に加えて廃棄物処理とエネルギー生産を設定すること、③PLCAソフトウェアでも、機能単位を無次元化する方法により、農業地域LCAが可能であることの3点が重要であることを明らかにすることができた。今後は、実在する地域を事例にこのLCAを適用し、前述の3つの役割を担うツールとしての農業地域LCAの完成度を高める必要がある。

現在のLCA研究の方向は、特性化カテゴリー別の環境負荷数値への重み付けによって、評価する対象と環境負荷との因果関係を明確化し、LCA実践者だけでなく利用者にも判りやすい手法の開発が主眼である。しかし、このような研究により、LCAの公開性や透明性が確保されたとしても、「LCAや環境監査が静的な現状分析で終わる場合、真に持続可能な社会をデザインすることは不可能である」という議論に抗することはできない（註16）。これは、LCAが比較評価手法であることに起因する。つまり、LCAを用いて、ある製品・サービス等の環境負荷の現状把握および現状と改善後の比較は可能であるが、これは相対評価であり、絶対評価ではない。環境負荷を低減させることは可能であるが、どこまで低減させる必要があるのか、という目標を明確化しない限り、持続可能な社会の定義を前述（註1）のように定めた場合、LCAを用いても持続可能な社会のデザインはできない。仮に、ある地域の環境負荷低減策における環境負荷とコストの関係が、第12図に示すようなものであった場合、LCAの目的は、費用対効果が最大化する環境負荷低減策（点A）を提示することではなく、環境負荷の削減目標を達成する環境負荷低減策に向けて、最も効率良く到達するための道程（点線矢印B）を示す事に他ならない。換言すれば、矢印Bの先端にある環境負荷低減策を達成するための必要条件を示し、条件をクリアするための社会システム構築の方向性を示すことである。

残された課題は、この目標をどう定めるかである。エネルギー消費に関しては、再生可能エネルギーへの全面的な移行という明確な目標があり、温暖化負荷の削減目標はこれに付随して決定できる。富栄養化や人体毒性に関しては、窒素動態の解析や、人間の生存に関するリスク評価の結果を用いて、ある程度仮定することができるだろう。この目標設定は、農業の環境影響評価のあり方にも関係する。これまでの農業の環境影響評価では、食料生産という機能に対する環境負荷が考慮されてきたが、このような機能の設定では、LCA結果を農業生産活動の現場にフィードバックすることは難しい（註17）。これは、前述のような機能と評価結果の因果関係の不明瞭さによるものと考えられるが、この点を解決するためにも、農



第12図 環境負荷とコストの関係の概念図

業LCAに際しては、これら問題特性ごとの目標を明確化する、あるいは、農業生産活動との関連の深さに応じて重み付けし、統合化するといった、明確かつ説得的な目標設定について検討する必要がある。

註16) 文献〔5〕p42参照。この文献の中では、設定すべき目標を漏斗（ファネル）と表現している。つまり、初めから漏斗の中心にある細い出口に相当する目標を設定しない場合、環境を考慮した市場の動向等により、漏斗の壁面に一旦衝突し、やむなく中心へと向かうことになり、相応のダメージを受ける、というイメージである。

註17) 筆者らのこれまでの調査では、地球温暖化のようなグローバルな問題で、その問題と農業生産活動との因果関係がはっきりしない場合、経営効率が環境問題に優先する傾向があった。このような状況下では、評価結果に基づくフィードバックを実施するインセンティブは農家には発生し難いであろう。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、科学技術振興事業団CREST環境研究室合田チームのメンバーである合田素行、両角和夫、田上貴彦、西澤栄一郎（敬称略）の各位から様々なご助言を頂いた。記して感謝の意を表する。

なお、本研究は科学研究費補助金奨励研究（A）「LCA拡大適用による農業地域の環境影響評価手法の開発に関する研究」の一環として行われた。

引用文献

- 〔1〕 独立行政法人産業総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター「第二回日本版被害算定型影響評価ワークショップ―生物多様性への影響評価―講演集」独立行政法人産業総合研究所ライフサイクルアセスメント研究センター，2002
- 〔2〕 エコマテリアル研究会MLCA部会「LCAを支える手法論（Ⅲ）」（社）未踏科学技術協会エコマテリアル研究会，2002
- 〔3〕 石川雅紀『実践LCA ISO14040対応』サイエンスフォーラム，1999
- 〔4〕 石谷久・赤井誠『対訳&解説ISO14040/JIS Q14040ライフサイクルアセスメント―原則及び枠組み―』産業環境管理協会，1999
- 〔5〕 カール・ヘンリク・ロベール『ナチュラル・チャレンジ』新評論，1998
- 〔6〕 農林水産省農業環境技術研究所編『農業におけるライフサイクルアセスメント』養賢堂，2000
- 〔7〕 農林水産省農業総合研究所「有機性資源プロジェクト 研究資料No.1デンマークの集中型バイオガスプラント―エネルギー生産，廃棄物処理，栄養分の再利用を統合する」農林水産省農業総合研究所，2000
- 〔8〕 小川吉雄『地下水の硝酸汚染と農法転換 流出機構の解析と窒素循環の再生』社団法人農

山漁村文化協会，2000

- [9] (社)未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会『LCAのすべて－環境への負荷を評価する－』工業調査会，1995
- [10] 社団法人産業環境管理協会 <http://www.jemai.or.jp/ecolabel/default.htm>
- [11] 高橋淳子・大村道明「スウェーデンにおけるSRC型エネルギー生産システムのLCA評価」『2001年度日本農業経済学会論文集』日本農業経済学会，2001
- [12] 時子山ひろみ・荏開津典生『フードシステムの経済学』医歯薬出版株式会社，1998
- [13] UNEP, “Life Cycle Assessment: What it is and How to do it”, 1996
- [14] 財団法人農林統計協会『平成13年度食料・農業・農村の動向に関する年次報告』，2002